

一种新型温湿敏集成传感器研制

吴孙桃 周海文 杨松鹤 吴荣华 陈议明

(厦门大学物理学系, 361005)

19971023 收稿, 19980316 收改稿

摘要 研制成由硅温敏二极管和聚酰亚胺湿敏电容集成的温湿度传感器。介绍了它的工作原理、结构设计、制作工艺、测试结果以及为提高它的性能所作的一些研究。

关键词: 温敏 湿敏 集成传感器

中图分类号: TP212 TN43

Development of a New Temperature and Humidity Sensitive Integrated Sensor

Wu Suntao Zhou Haiwen Yang Songhe Wu Ronghua Chen Yiming

(Dept. of Phys., Xiamen Univ., 361005, CHN)

Abstract: An integrated temperature and humidity sensor consisting of the silicon diode and the polyimide-based capacitive humidity sensor has been developed. The sensor working principle, structure design, manufacturing technology, measurement results and some studies of improving the sensor characteristics have been introduced.

Key Words: Temperature-sensitive Humidity-sensitive Integrated Sensor

1 引言

在许多应用领域,环境的温度和湿度必须同时测量,利用温湿敏集成传感器非常方便。近年来,有很多关于这类器件的研制工作^[1-3],硅温敏二极管和聚酰亚胺(以下简称PI)湿敏电容集成的温湿度传感器的研制^[1],便是其中的一种。硅温敏二极管是一种体积小、测温准确、便于集成化和多功能化的新型感温元件;聚酰亚胺作为感湿膜已在湿度敏感器中得到良好应用^[4,5],而且制造工艺与集成电路工艺相容,因此这两种元件非常适合于集成化。笔者研制这两种元件垂直叠置的集成温湿度传感器,从提高性能考虑,进一步研究了该传感器的材料电阻率选择、电极结构设计等。

• 福建省科技资助项目

2 工作原理

2.1 温敏二极管工作原理^[6]

理想 PN 结正向电压 V_f 作为正向电流 I_f 和热力学温度 T 的函数表达式如下:

$$V_f = V_{g0} - \left(\frac{K}{q} \ln \frac{C}{I_f} \right) T - \frac{KT}{q} \ln T^\gamma \quad (1)$$

式中, V_{g0} 是外推到热力学零度时 PN 结材料的导带底和价带顶的电势差, K 为玻尔兹曼常数, q 为电子电量, C 是与温度无关并包含结面积的常数, γ 是与迁移率有关的常数。实际应用中, 在一定的工作温度范围内, PN 结特性与理想模型基本相符, 可用上式来描写 PN 结的电流—电压及温度特性。

如在某一已知的温度 T_1 下, 工作电流 I_f 为 I_{f1} , 则正向电压 V_{f1} 为

$$V_{f1} = V_{g0} - \left(\frac{K}{q} \ln \frac{C}{I_{f1}} \right) T_1 - \frac{KT_1}{q} \ln T_1^\gamma \quad (2)$$

由(1)和(2)式, 可以得到

$$V_f = V_{g0} - (V_{g0} - V_{f1}) \frac{T}{T_1} - \frac{KT}{q} \ln \left[\left(\frac{T}{T_1} \right)^\gamma \left(\frac{I_{f1}}{I_f} \right) \right] \quad (3)$$

由上式可知, 在正向电流 I_f 一定时, 正向电压只随温度变化而变化, 温度升高, 正向电压下降, 具有负温度特性, 由于 $\ln(T/T_1)$ 是 T 的缓变函数, 所以 V_f 与 T 之间在一定的温度范围内呈现近似线性关系。根据(2)式和(3)式, 可以制造温敏二极管, 通过对其正向电压的测量, 实现对温度的检测。在上式中, 当 I_f 等于 I_{f1} 时, V_f 和 T 的关系可简化为

$$V_f = V_{g0} - (V_{g0} - V_{f1}) \frac{T}{T_1} - \frac{KT\gamma}{q} \ln \frac{T}{T_1} \quad (4)$$

将(4)式对温度求导, 得到灵敏度表达式为

$$S = - \frac{V_{g0} - V_{f1}}{T_1} - \frac{K\gamma}{q} \left[1 + \ln \left(\frac{T}{T_1} \right) \right] \quad (5)$$

2.2 湿敏电容工作原理

PI 湿敏电容是以 PI 有机高分子薄膜为介质的平行板电容器, 实际上是以 PI 和水的复合物为介质。当水分子浓度在空间变化时, 该膜吸附水分子数量也跟着相应变化, 从而引起介电常数的变化。已有很多理论和经验公式来描述 PI 和水复合物的介电性, 根据 Looyenga 的半经验关系式^[7]

$$\epsilon = \left[v(\epsilon_2^{\frac{1}{3}} - \epsilon_1^{\frac{1}{3}}) + \epsilon_1^{\frac{1}{3}} \right]^3 \quad (6)$$

式中的 ϵ 、 ϵ_1 和 ϵ_2 分别为复合物、PI 和水的介电常数, v 为 PI 吸水的体积百分数。PI 本身的介电常数很小, 只有 2.93, 而水的介电常数在室温时为 80^[8]。湿度越大, PI 薄膜吸附的水分子越多, v 越大, 复合介电常数 ϵ 就增大, 正是根据这一原理制成 PI 薄膜电容式湿度敏感元件。当然, 在 PI 薄膜吸收或放出水分子时, 也会引起薄膜厚度的变化, 但因 PI 膜很薄, 薄膜厚度的变

化对电容值的影响比起介电常数 ϵ 对电容值的影响要小得多,亦即表明主要是介电常数 ϵ 的变化引起电容值的改变。

3 设计与制作工艺

选择三种 N 型 Si 片,分别用 E、F、G 表示,E 是外延片,外延层电阻率为 $8\sim 10\ \Omega\cdot\text{cm}$ 、厚度 $23.5\ \mu\text{m}$;G 也是外延片,外延层电阻率为 $5\sim 6\ \Omega\cdot\text{cm}$ 、厚度 $28\ \mu\text{m}$;F 是没有外延层的单晶片,电阻率为 $6.5\sim 8\ \Omega\cdot\text{cm}$ 。通过 SiO_2 窗口进行硼扩散制造 P^+N 结二极管。硼扩散窗口设计成圆形,半径 $600\ \mu\text{m}$ 。硼预扩的温度为 $980\ ^\circ\text{C}$,硼再扩的温度为 $1180\ ^\circ\text{C}$,结深控制在大约 $3.5\ \mu\text{m}$ 。以二极管的上电极作为 PI 湿敏电容的下电极,湿敏电容的上电极设计成环状和梳状两种,分别用 1[#] 和 2[#] 表示。1[#]:10 个同心环,环宽 $60\ \mu\text{m}$,环间距 $60\ \mu\text{m}$,最外环半径 $1280\ \mu\text{m}$,过圆心有两条互相垂直的宽 $80\ \mu\text{m}$ 的连接条;2[#]:32 条梳状电极,梳齿长 $3320\ \mu\text{m}$ 、宽 $80\ \mu\text{m}$ 、间距 $80\ \mu\text{m}$,整个电极长 $5040\ \mu\text{m}$ 、宽 $3400\ \mu\text{m}$ 。图 1 给出传感器湿敏电容电极结构简图,图中所示的下电极是从上面引出的部分,是利用光刻工艺将 PI 薄膜腐蚀出窗孔而引出的(……表示作图省略部分)。

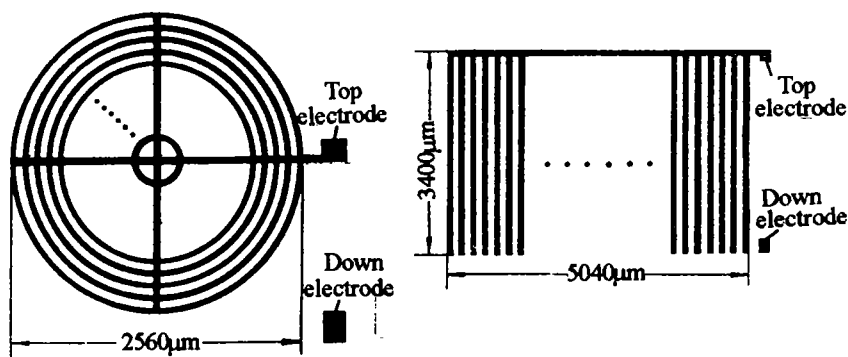


图 1 传感器湿敏电容上电极结构简图:

(a) 圆环结构形状的上电极; (b) 梳齿结构形状的上电极

Fig. 1 Top electrode structure of the capacitive humidity sensor:

(a) Circle ring shape; (b) Comb shape

主要工艺流程:

一次氧化→刻基区→硼预扩→硼再扩→磨背面→背面磷扩散→再氧化→刻引线孔→蒸铝→反刻铝→磷合金→初测→涂敷 PI→刻电容下电极引线孔→固化(亚胺化)→蒸金→反刻金→初测→划片、筛选→装片→引线→终测

PI 薄膜是利用旋转涂敷法将涂胶均匀涂敷在已制备好二极管管芯的硅片上,通过控制转盘转速,制备大约 $1.5\ \mu\text{m}$ 厚度的 PI 薄膜,厚度由日立—520 扫描电镜(SEM)作剖面测量。将已涂敷 PI 的片子,放入 $100\ ^\circ\text{C}$ 的恒温箱中烘干 30 min,然后光刻下电极引线孔,接着将片子放入烧结炉中,慢慢升温至 $150\ ^\circ\text{C}$,经 10 min 后,再升高到 $300\ ^\circ\text{C}$,在 $300\ ^\circ\text{C}$ 的炉中恒温 1 h,

进行亚胺化,其后,温度升至 380—420 ℃,通氧去除光刻胶。

4 测试方法与结果

器件温敏二极管的 V_f — T 关系是在 TH—J 型 PN 结正向压降温度特性测试仪上进行。在正向电流恒定为 100 μA 下,测量 ΔV_f — T 的对应值。本测试从室温开始测量,逐渐升温,在初始温度记下 V_f 值,调节“ ΔV ”使 ΔV_f 为零。在整个测试中,按 ΔV_f 每改变 10 mV 立即读取一组 ΔV_f 、 T ,升温速率控制得很慢,测量的温度最高到 120 ℃。电容(C)与相对湿度(%RH)的关系特性测量,采用饱和盐溶液法,取 0%RH—100%RH 范围六种饱和盐水溶液:LiCl·H₂O、Mg-Cl₂·6H₂O、Mg(NO₃)₂·6H₂O、NaCl、KNO₃、K₂SO₄。各种饱和盐水溶液的湿度固定点,采用美国国家标准局(NBS)1976 年所提供的数据^[9]。测量时,将各待测的器件置于各配制的饱和盐水溶液湿度发生装置中,分别在 20、30、50 ℃对器件进行湿度的测量,用 DT9213 数字电容表读出电容值,测试频率为 800 Hz。

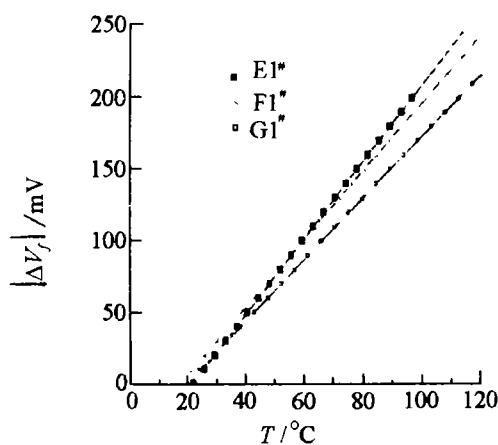


图 2 100 μA 恒定电流下, E1[#]、F1[#] 和 G1[#] 器件的 $|\Delta V_f|$ — T 特性:

■×O 测试结果; — 拟合结果

Fig. 2 $|\Delta V_f|$ — T characteristics of E1[#], F1[#] and G1[#] samples under $I_f=100 \mu\text{A}$:

■×O The measured results;
— The fit results

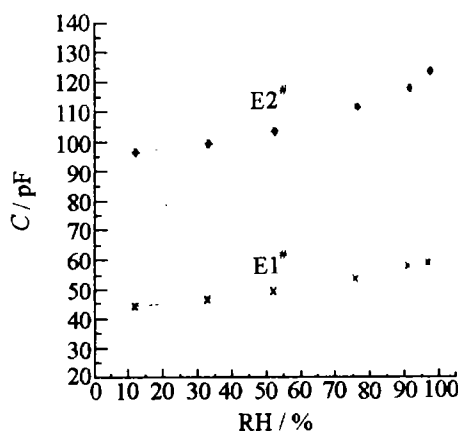


图 3 30 ℃时 E1[#] 和 E2[#] 器件的 C —%RH 特性:

◆× 测试结果;
— 拟合结果

Fig. 3 C —%RH characteristics of E1[#] and E2[#] samples at 30 ℃

◆× The measured results;
— The fit results

进行了大量测试。图 2、3 给出有代表性的正向电压 $|\Delta V_f|$ —温度 T 特性和电容 C —相对湿度 %RH 特性的测试结果。根据测试结果,器件的温敏特性具有优良的线性关系,利用直线拟合处理测试数据,相关系数基本上大于 0.99。图 2 为三个器件的正向电压—温度特性的测试结果和拟合直线,测试结果表明,选取的硅材料电阻率越高,器件的温度灵敏度就越高,由拟合直线计算正向电压对温度的灵敏度,结果表明,用 E 种材料制造的器件,灵敏度可以达到 2.68 mV/℃;用 F 种材料,灵敏度可达 2.38 mV/℃;用 G 种材料,灵敏度可达 2.16 mV/℃。

图3为两个器件在测试温度为30℃时的电容—相对湿度特性的测试结果和拟合曲线,可以看出,采用1[#]同心圆环结构形状的上电极与采用2[#]梳状的上电极相比较,1[#]器件的感湿特性具有较好的线性;2[#]上电极结构的有效面积比1[#]大,采用2[#]上电极结构的湿敏电容的电容值和灵敏度比1[#]大。

从低湿到高湿,再从高湿到低湿,对器件完成一个测试循环,结果表明,测试值基本相符,湿滞效应很小。在20、30、50℃三种温度下,同一个器件的感湿特性曲线几乎重合。在室温下,将器件从KNO₃盐瓶(相对湿度在90.7%RH—93.2%RH范围)快速移到空气,湿敏电容随时间变化,利用秒表记录到15s时的电容变化量,与最后变化到稳定时的变化量比较,大部分被测器件到15s时的电容变化量大于最后稳定时的变化量的90%,这表明,器件湿敏电容的脱湿响应时间小于15s。在两个多月中,对一些器件从自然环境里放进湿度瓶中进行几次相同条件的测试,大部分被测器件的湿敏特性的稳定性良好。

根据测试结果,所研制的器件具有良好的特性。

5 讨 论

对于器件的湿敏二极管部分,选取高电阻率的材料,有利于提高它的温度灵敏度,但是,根据理论分析,材料的电阻率不宜选得过高,这是因为材料的电阻率越高,掺杂浓度越小,本征激发不可忽略的工作温度就越低,这样会降低湿敏二极管工作温度的上限,另外,衬底材料的电阻率高,不利于改善PN结正向电压低温区的非线性^[10]。对于器件的湿敏电容部分,采用同心圆环结构形状的上电极与采用梳状的上电极比较,感湿特性曲线具有较好的线性;上电极的有效面积比较大,可以得到较大的湿敏电容的电容值,也有利于提高感湿灵敏度,但是,从小型化和工艺成品率考虑,总电极面积的设计不能过大。

参 考 文 献

1. Tatsu Yamamoto. *Transducers*, 1987; 658-660
2. Ling Mingfang, Li Haiguo. *Sensors and Actuators B*, 1993; 12; 53-56
3. 詹 娟, 陈国平. 传感技术学报, 1992(3); 13-16
4. Takaaki Kuroiwa, Tomohito Hayashi, Akihiko Ito. *Sensors and Actuators B*, 1993; 13/14; 89-91
5. Karsten Seger, Gerald Gerlach, Andreas Schroth. *Sensors and Actuators B*, 1994; 18/19; 85-88
6. 马英仁编著. 温度敏感器件及其应用, 北京: 科学出版社, 1988; 94-152
7. Peter J Schubert, Joseph H Nevin. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1985; ED-32(7); 1 220-1 223
8. 邹德超, 王东风. 仪表技术与传感器, 1992(1); 6-7
9. 李标荣, 张绪礼主编. 电子传感器, 北京: 国防工业出版社, 1993; 149-150
10. 文 彬, 徐秀华. 传感技术, 1993(2); 24-27

吴孙桃(Wu Suntao) 男, 1947年生。1981年厦门大学物理学系研究生毕业, 获硕士学位, 副教授。1985年9月至1986年11月在美国Case大学(Case Western Reserve University)电子设计中心为访问学者。现在厦门大学物理学系, 从事半导体物理与器件物理专业工作。



周海文(Zhou Haiwen) 女, 1950年生。工程师, 现在厦门大学物理学系, 从事半导体物理与器件物理专业的工作。

